第 42 卷 第 1 期
2024 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 42, No. 1
Mar., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.08

棒与星系整体恒星形成性质关系的统计研究

穆子豪[1,2]，沈世银[1,3]，Rafael S. de Souza[4]，Ana L. Chies-Santos[5]

(1. 中国科学院 上海天文台 星系宇宙学重点实验室，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 星系和宇宙学半解析研究重点实验室，上海 200034； 4. 赫特福德大学 天体物理研究中心，英国哈特菲尔德学院巷，AL10 9AB； 5. 南里奥格兰德州联邦大学 科学研究所，巴西阿雷格里港，9500)

摘要： 盘状星系中的棒结构特征与星系自身所处环境及整体恒星形成特征之间存在复杂的相互关系。利用细致的星系形态特征测量计划 Galaxy Zoo DECaLS 中的数据构建了一组目前最大的具有同样恒星质量分布的强棒、弱棒和无棒星系样本。通过引入星系所处暗晕质量及相空间特征来控制星系所处的环境效应之后，进一步对比研究强棒、弱棒和无棒星系的恒星形成特征。研究表明，有棒星系中的恒星形成熄灭的比例系统地高于无棒星系，且强棒的效应更为明显。但是，对于仍处于恒星形成主序上的星系来说，强棒、弱棒和无棒星系的恒星形成特征并没有显著差别。以上结果表明，星系中的棒特征在其存在的时标中可能使部分星系迅速地从恒星形成转入熄灭状态。

关 键 词： 棒旋星系；恒星形成；环境

中图分类号： P160.5 **文献标识码：** A

1 引 言

棒是一类盘状星系中重要的子结构，贯穿于星系中心区域，对星系的形成与演化起着重要作用[1−3]。在天文观测中，带棒的旋涡星系 (以下简称棒旋星系) 在宇宙中的比例占据三分之一以上。在不同样本 (特别是不同红移处) 的观测结果中，此比例还有所不同，范围为 30% ∼ 60% [4−7]。不同的数值模拟工作得到的结果也不尽相同，但得到的棒旋星系占比普遍都在 30% 以上[8−10]。在前人研究中，通常会根据棒的宽度、长度 (或相对星系自身

收稿日期： 2023-04-25； **修回日期：** 2023-05-29

资助项目： 国家重点研发计划 (2022YFF0503402)；载人航天项目 (CMS-CSST-2021-A07)；上海市优秀学术带头人计划 (22XD1404200)

通讯作者： 沈世银，ssy@shao.ac.cn

的宽度、长度) 等参数来定义棒的强弱，将棒旋星系分为强棒 (strong bar, SB) 星系和弱棒 (weak bar, WB) 星系。观测表明，棒的存在与否以及强弱特征与星系的物理性质密切相关。Cervantes 等人[11]发现强棒更偏向处于颜色偏红的星系中，而弱棒更多分布于颜色偏蓝的星系中；Lee 等人[6]也发现弱棒更倾向于颜色偏蓝的小质量星系；而 Kim 等人[3]则发现弱棒星系在比恒星形成率 (specific star formation rate, sSFR)、多个波段的颜色 ($g-r$、$NUV-r$、中红外线 [3.4]−[12]) 和中性氢 (HI) 等参数上与无棒星系很相似。

一般认为，棒会使星系外围的气体发生内流，进而集中在星系中心处，导致中心处短时间内恒星形成率 (star formation rate, SFR) 的升高[2]。但当气体消耗殆尽后，星系整体会进入长时间的恒星形成率较低的阶段，即“熄灭”(quench) 阶段[3, 12]。也就是说，棒的存在既可能与星系的恒星形成增强现象相关，也可能与“熄灭”状态相伴。因此，观测中，强棒星系整体颜色偏红的现象不能简单地用棒导致的“熄灭”过程加以解释。另一方面，由于弱棒样本相对较少，有关弱棒对星系整体物理性质的影响，目前相关研究还较少。

星系中的棒具有较复杂的形成机制，一般认为与星系内部结构的不稳定性和外部环境的扰动都相关。有关数值模拟的工作发现，棒可能在盘自身的动力学不稳定性下产生[13]，也可能在星系间的相互作用中被触发生成[14]。此外，星系所处的环境，特别是小尺度的环境还可能对星系中棒的演化产生重要影响。比如，星系对 (galaxies pairs) 中产生的强相互作用可能会摧毁棒结构[15]；星系-星系之间的飞掠 (flyby)[16]或并合 (merger)[17]现象可能会使棒的强度减弱，长度缩短，甚至将棒摧毁。

在观测上，棒与星系所处的环境之间是否存在相关性目前尚无明显的共识。Tawfeek 等人[15]研究了宇宙大尺度下的星系团 (cluster) 的结构与棒的相关性,发现在星系团外围的旋涡星系或星系团位力半径内的椭圆星系中，含棒的星系比例最多。另一方面，也有工作指出棒与环境并无明显相关性或环境并未起到重要作用，例如 Sidiney[18] 通过研究棒旋星系在星系群 (group)、星系团和星系场 (field) 内的比例，没有发现不同的环境中棒的形成有较大差别；Barazza 等人[19]发现星系团和星系场的有棒星系的比例，以及棒的长度和宽度都很相似；Sarkar 等人[20] 认为棒的形成受星系内部过程的影响更多，而不是环境。

虽然星系的棒特征与环境之间的关系尚不清楚，星系中的恒星形成过程与其所处的环境之间的关系却已经得到了充分的研究。比如，星系团对星系的冲压剥离 (ram-pressure stripping)[21]会将星系中的气体吹走，降低恒星形成率，使星系转变为“熄灭”星系，从而解释大质量暗晕中星系的整体颜色偏红的现象。此外，星系间的并合[22]同样会使气体向中心聚集，触发星系中的星爆现象，而在星爆阶段之后，气体的不足会降低恒星形成率，星系进入“熄灭”阶段。

综上所述，如果棒的形成和演化过程也与星系所处的环境密切相关，那么就需要重新审视观测中棒和星系整体恒星形成性质之间的关联。且由于星系中弱棒特征的判断较为困难，目前，还缺少将星系中的棒特征 (强棒和弱棒) 与 SFR、环境之间的因果关系进行分离的详尽研究。

最近，Galaxy Zoo DECaLS (以下简称 GZD) 发布了新一代的公共志愿者参与的星系形态学分类样本，能够更清晰地捕捉到细致的星系形态学特征 (例如弱棒，旋臂等)。本文的研

究目的正是利用 GZD 样本来进行棒旋星系中棒、SFR 以及环境三者之间关联的分析，同时增强对弱棒星系特征的了解。本工作的优势在于 GZD 样本中可用于进行棒旋星系分析的样本为迄今为止最大的数据样本，能帮助进行更为细致的分析。本文的结构如下：第 2 章介绍本工作所用数据；第 3 章列出本工作统计结果；第 4 章总结相关结果并进行讨论。

2 数据

我们在本章中详细介绍本文使用的星系样本和相关数据，其中 GZD 数据在 2.1 节中介绍，恒星形成参数以及环境参数在 2.2 节中介绍。

2.1 星系棒相关信息

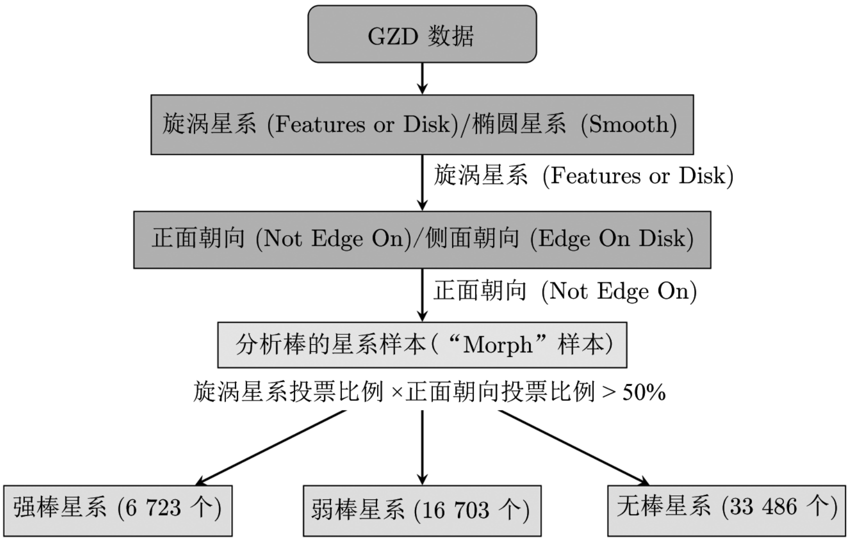
我们的棒旋星系样本是从 Walmsley 等人[24] 发布的 GZD 项目数据中得到的。Galaxy Zoo 项目起源于斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)，通过收集公共志愿者对星系图像的投票，来解决天文学家无法处理的海量图像分类的问题。DECaLS① 作为 DESI② 测光巡天中的三个子项目之一，其测光深度比 SDSS 要高出一个星等以上，因而能够更清晰分辨星系的细致形态[25]。GZD 项目分为三期，分别是 GZD-1、GZD-2 和 GZD-5。最早的 GZD-1 项目从 2015 年开始，GZD-5 项目则结束于 2020 年。在三期项目中，公共志愿者对这些同样存在于 SDSS 主星系样本 (定义为 $r < 17.77$ mag) 中的 313 789 个星系进行了形态学分类的投票，其中不仅有对于星系图像上的棒、旋臂、核球等子结构的存在与否的投票，同时也有对存在的结构的强弱、数量等问题进行的回答。而 GZD-5 中形态学判定所依据的决策树，相较于 1 和 2，分类更加详细。由于 GZD-5 的数据样本远大于 GZD-1 和 GZD-2，为减少时间和人力成本，其工作团队通过一种主动学习算法，优先挑选“信息量大”的星系图像交由志愿者分析，以取得尽可能多的分类投票。随后团队通过贝叶斯深度学习算法，将 GZD-5 中志愿者的投票用来训练此算法。训练完成后，该算法预测了 GZD 三个项目中所有的星系在面对 GZD-5 决策树不同节点时的答案。本文所应用的 GZD 数据集即为该团队应用深度学习所预测的数据集。

本文研究的重点是星系中的棒结构，在进行棒的特征判断之前需要先选取样本中正面朝向的旋涡星系。此步之后得到的样本才用来作为棒的分析样本，也就是再将其划分为强棒、弱棒和无棒 (no bar，NB) 星系来进行分析。对应到 GZD-5 的决策树中，我们选取“旋涡星系 (Features or Disk)”以及“正面朝向 (Not Edge On)”两个标签的投票比例相乘大于 50% 的样本，将其作为可分析棒星系的样本。该样本数目有 56 912 个源，考虑到该样本提供棒这个形态学 (morphology) 信息，方便起见，我们将此样本命名为“Morph”样本。基于“Morph”样本，本文进一步根据模型预测的投票数据进行分类，若模型对单个星系的“无棒”选项投票比例大于 50%，我们则认其为“无棒星系”(数目：33 486 个)；在除去上述“无棒星系”后剩余的星系中，投票为“弱棒”的比例大于“强棒”的比例的则被认

① https://www.legacysurvey.org/decamls/

② https://www.desi.lbl.gov/

为是“弱棒星系”(数目：16 703 个)，反之则为“强棒星系”(数目：6 723 个)。以上“无棒”、“弱棒”和“强棒”的样本的选择流程图见图 1。



注：判定为强棒星系需遵循“无棒投票比例小于 50% 且强棒投票比例大于弱棒投票比例”，判定为弱棒星系需遵循“无棒投票比例小于 50% 且强棒投票比例小于弱棒投票比例”，判定为无棒星系需遵循“无棒投票比例大于 50%”。

图 1 获取“Morph”样本所用流程图

2.2 星系其他参数信息

对于星系的其他物理参数，我们选取了 GALEX-SDSS-WISE Legacy Catalogue-X2 (GSWLC-X2)①数据中的恒星形成相关参数。GSWLC-X2 覆盖 90% 的 SDSS 主星系样本天区，其星系整体 SFR 和恒星质量 (M_*) 是根据紫外/光学的测光和红外的光度相结合的光谱能量分布 (spectral energy distribution, SED) 拟合所得到。基于恒星质量和整体 SFR，我们进一步计算星系的 $sSFR$ ($sSFR = SFR/M_*$)。我们将“Morph”样本与 GSWLC-X2 进行交叉匹配后得到共 43 221 个源，并将此命名为“Morph-SFR”样本。

对于环境相关参数，我们选取了 Yang 等人[26]的星系群样本②。在其关于斯隆数字巡天项目第七期 (SDSS DR7) 的星系群样本中，给出了每个星系所属的群的一些信息，包括星系群的坐标、红移、光度、恒星质量和暗晕质量 (M_h) 等信息。星系群样本根据三种不同组合的红移信息(只有 SDSS 红移、SDSS 红移+2df 红移、SDSS 红移 +2df 红移+最近邻红移插值+ROSAT X-ray 星系团数据集中的红移)以及两种不同的绝对星等 (petrosian 星等、model 星等)，给出了具有细微差别的 6 种不同的星系群样本。考虑到最近邻红移插值带来的不确定性以及 model 星等覆盖星系总体流量，我们将“Morph”样本与 SDSS 红移+2df

①https://salims.pages.iu.edu/gswlc/

②https://gax.sjtu.edu.cn/data/Group.html

红移+model 星等的子样本进行交叉匹配，获得了 35 807 个星系所处暗晕的信息，将此样本命名为“Morph-M_h”样本。对于没有匹配到暗晕信息的源，主要原因是星系群样本中只计算 r 波段绝对星等亮于 -19.5 mag 的星系所属暗晕质量[26]。在星系群样本中提供了两种不同的暗晕质量，分别是通过星系群内恒星质量和星系群内恒星光度计算得到，我们选取了星系群内恒星质量计算得到的数据作为该星系所处暗晕质量。

我们通过 M_h、星系群红移等信息计算星系群中 180 倍宇宙平均密度处的半径 (r_{180})，视其为星系群的位力半径，具体公式为：

$$r_{180} = 1.26h^{-1}\left(\frac{M_h}{10^{14}h^{-1}M_\odot}\right)^{1/3}(1+z_{\rm group})^{-1} \quad , \tag{1}$$

其中，r_{180} 的单位为 Mpc，$z_{\rm group}$ 为星系群的红移值，h 为哈勃常数。为简单起见，本文的 h 取为 0.73。我们定义星系群中恒星质量最大的星系为星系群中心，计算其余星系与此中央星系的投影距离 r，再将 r 用星系群的位力尺度 r_{180} 归一化后得到的 r/r_{180} 视为星系所处星系群里的位置①。

此外，我们通过星系群数据集中的星系红移得到每个星系的视线方向退行速度 $V_{\rm los}$，计算其与星系群整体视线方向退行速度之差为 $|\Delta V|$。此外，与 Yang 等人一样[26]，我们采用了 Beer 等人[27] 提出的差距估计 (gapper estimator) 的方法来计算星系群的视线方向速度弥散 σ。在此步骤中，我们只计算拥有三个及以上成员星系的星系群的 σ 值。此类星系只占星系群样本 20% 左右，故在“Morph-M_h”样本中，同时拥有暗晕质量和 σ 值的星系从 35 807 缩减为 8 142 个，我们将此样本命名为“Morph-M_h/σ”样本。

综上所述，我们得到星系所处暗晕的质量 (M_h)、星系相对于星系群的退行速度 $|\Delta V|$、星系群视线方向的速度弥散 (σ) 以及星系所处暗晕的位置 (r/r_{180}) 等参数。在 3.1 节中我们将利用这些参数构建相空间图 (phase space diagram)，对星系所处环境的动力学状态进行进一步分析。

值得一提的是，GSWLC-X2 数据计算恒星质量等参数时所用的初始质量函数 (initial mass function, IMF) 为 Chabrier IMF[23]，所用宇宙学参数为 Ω_m =0.272、$\Omega_\Lambda = 0.728$、$h = 0.704$；而 Yang 等人[26]的星系群样本所用宇宙学参数为：$\Omega_m = 0.238$、$\Omega_\Lambda = 0.762$、$h = 0.73$。由于本文样本的平均红移仅为 $z \approx 0.1$，我们忽略两个样本中宇宙学参数 Ω_m 和 Ω_Λ 差异的影响。对于 h ，本文统一使用 $h = 0.73$ 对 GSWLC-X2 数据集中每个星系的 SFR 和恒星质量进行了改正。

2.3　样本

我们在此小节列出本工作所用样本，详见表 1。

表 1 中，只包含了棒相关信息的样本为“Morph”，样本大小为 56 912 个；包含了棒相关信息和恒星形成相关信息的样本为“Morph-SFR”，样本大小为 43 221 个；包含了棒相关信息和暗晕质量的样本为“Morph-M_h”，样本大小为 35 807 个；包含了棒相

①对于星系群中的成员星系来说，由于存在本动速度 (和星系群的速度弥散相当)，我们无法利用红移计算出其成员星系在视线方向上的真实距离，因此只能计算出成员星系处于星系群中的投影距离，而无法计算出真实距离。

表 1 样本中各类星系的数目

样本名	强棒星系/个	弱棒星系/个	无棒星系/个	总数目/个
Morph	6 723	16 703	33 486	56 912
Morph-SFR	5 151	12 833	25 237	43 221
Morph-M_h	4 848	10 174	20 785	35 807
Morph-M_h-SFR	4 273	9 036	18 445	31 754
Morph-M_h/σ	1 289	2 513	4 340	8 142
Morph-M_h/σ-SFR	1 125	2 215	3 787	7 127

关信息，暗晕质量和暗晕速度弥散度星系的样本为“Morph-M_h/σ”，样本大小为 8 142 个；“Morph-SFR”和“Morph-M_h”样本交叉所得样本为“Morph-M_h-SFR”，样本大小为 31 754 个；“Morph-SFR”和“Morph-M_h/σ”样本交叉所得样本为“Morph-M_h/σ-SFR”，样本大小为 7 127 个。考虑不同问题时将用不同样本进行分析。不同样本中无棒、弱棒和强棒三个子样本的数目也同样在表 1 中给出。

基于以上样本，我们在进行对比研究的时候还需要进一步构建控制样本。在构建控制样本时，我们在对数空间对参数 (比如恒星质量、暗晕质量) 进行样本匹配，所选取阈值为 0.1 dex。

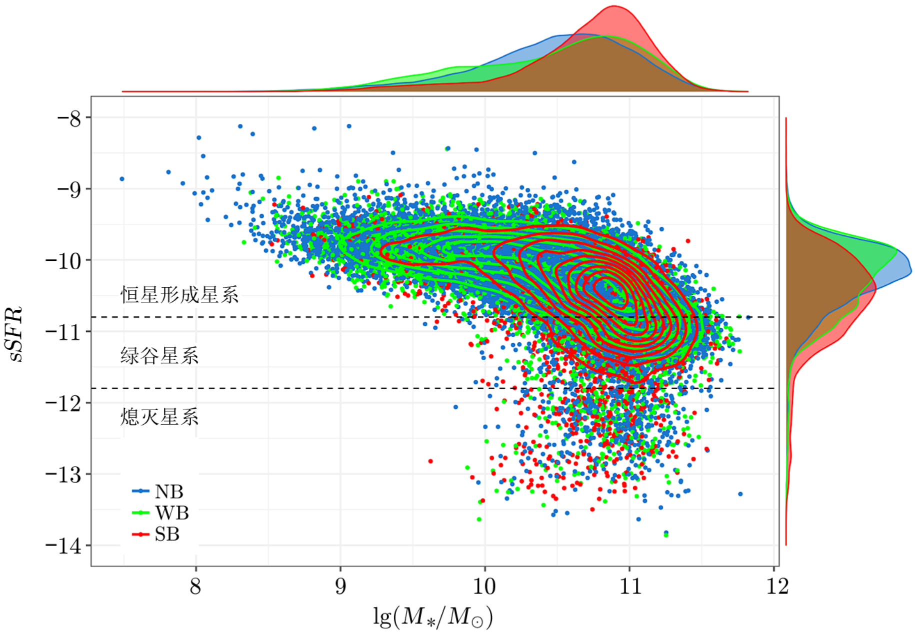
3 结果

在本章中，我们在第一小节讨论棒星系的恒星形成情况，第二小节讨论棒星系所处环境，第三节讨论控制环境之后棒星系的恒星形成情况。

3.1 棒星系与恒星形成

首先，我们在图 2 中给出“Morph-SFR”样本中，三种棒星系的恒星质量和比恒星形成率的分布 (散点和等数密度轮廓)，其横坐标为 $\lg(M_*/M_\odot)$，纵坐标为 $sSFR$。红色数据为强棒样本，绿色为弱棒样本，蓝色为无棒样本。上边界图为恒星质量数密度分布图，右边界图为 $sSFR$ 数密度分布图。我们参照 Salim[28] 的工作，将 $sSFR > -10.8$ 的星系定义为恒星形成星系 (“star forming”galaxy, SF)，将 $-11.8 < sSFR < -10.8$ 的星系定义为绿谷星系 (“green valley”galaxy, GV)，将 $sSFR < -11.8$ 的星系定义为熄灭星系 (“quench”galaxy, Quench)。由上边际和右边际图中红色密度分布曲线可以看出，样本中强棒星系相对于弱棒星系和无棒星系，质量偏大，$sSFR$ 偏低。由于恒星质量和 $sSFR$ 之间存在内禀的相关性，因此需要控制样本的恒星质量后，来进一步对比棒星系的 $sSFR$ 特征。此外，由于本文重点考察的是星系的棒特征和 $sSFR$ 的关系，而星系的颜色 (特别是 $NUV-r$) 直接体现的就是其 $sSFR$，因此我们在本节和 3.3 节中都不对星系的颜色特征进行控制。

基于强棒星系样本，我们通过阈值 (0.1 dex) 在无棒和弱棒样本中选取一一对应的恒星质量分布的星系来构建控制样本，最终得到三种类型星系的样本个数各为 5 151 个。图 3a)



注：横坐标为 $\lg(M_*/M_\odot)$，纵坐标为 $sSFR$。上边际图为 M_* 分布图，右边际图为 $sSFR$ 分布图。红色图例为强棒样本 (SB: 5 151 个)，绿色为弱棒样本 (WB: 12 833 个)，蓝色为无棒样本 (NB: 25 237 个)。

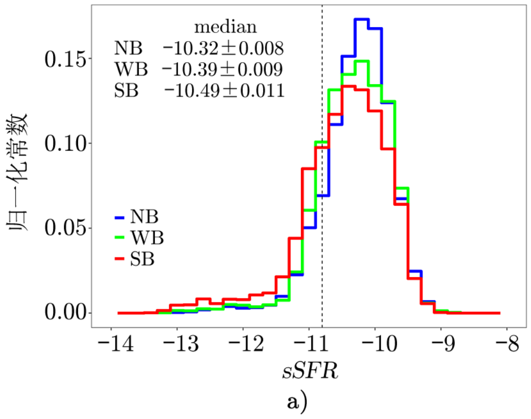
图 2　“Morph-SFR”样本中三种类型星系的 M_* 和 $sSFR$ 的散点图和轮廓图

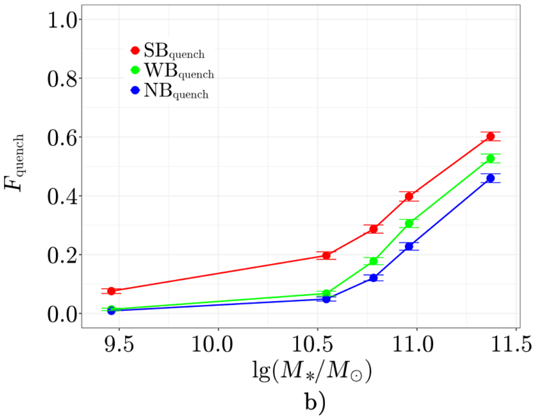
为控制恒星质量之后，三种棒星系样本的 $sSFR$ 频率分布直方图。红色数据代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系。图中虚线为 $sSFR = -10.8$，右侧为 SF 星系，左侧为 Quench 星系和 GV 星系。可以看出棒旋星系相较于无棒星系，$sSFR$ 分布更偏向于较低的一端，强棒星系更加显著。在图 3a) 的左上角图标中为三种棒样本中 $sSFR$ 的中位值及误差，误差估计采用对样本进行有放回的随机抽样 1 000 次后，计算得到的 1 000 个中位值的标准差。由中位值可以看到有棒星系的 $sSFR$ 相比于无棒星系更低，强棒星系最为明显。

由于熄灭星系整体比例并不高，所以在研究 $sSFR$ 整体分布中其特征并不能显著显示。因此，我们引入熄灭星系所占据的比例 (quench fraction，$F_{\rm quench}$)这一参数来进一步分析，其计算公式如下：

$$F_{\rm quench} = \frac{N_{\rm quench} + N_{\rm GV}}{N_{\rm Total}} \quad , \tag{2}$$

其中，N 为不同类型的星系个数。图 3b) 给出了控制样本中三种棒星系中各自的 $F_{\rm quench}$。我们将各样本等数目分为 5 个间隔，每个间隔中所有星系的恒星质量的均值为此间隔在 x 轴的横坐标，$F_{\rm quench}$ 的误差同样是通过有放回的随机抽样进行估算。可以看到，随着星系恒星质量的增大，各样本中的 $F_{\rm quench}$ 都随之增加[29]。但是对于强棒、弱棒和无棒星系样本，$F_{\rm quench}$ 存在显著的系统差异，强棒星系的 $F_{\rm quench}$ 显著且系统性地高于弱棒和无棒星系。弱棒和无棒星系中的 $F_{\rm quench}$ 整体上比较接近，但弱棒星系仍然系统性地高于无棒星系。





注：a) 控制了 M_* 的三种不同棒特征星系的 $sSFR$ 的直方图。b) 控制了 M_* 的三种棒样本中 $F_{\rm quench}$ 的点线图。红色图例代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系。

图 3 “Morph-SFR”样本中控制样本的三种类型星系的 $sSFR$ 分布及 $F_{\rm quench}$

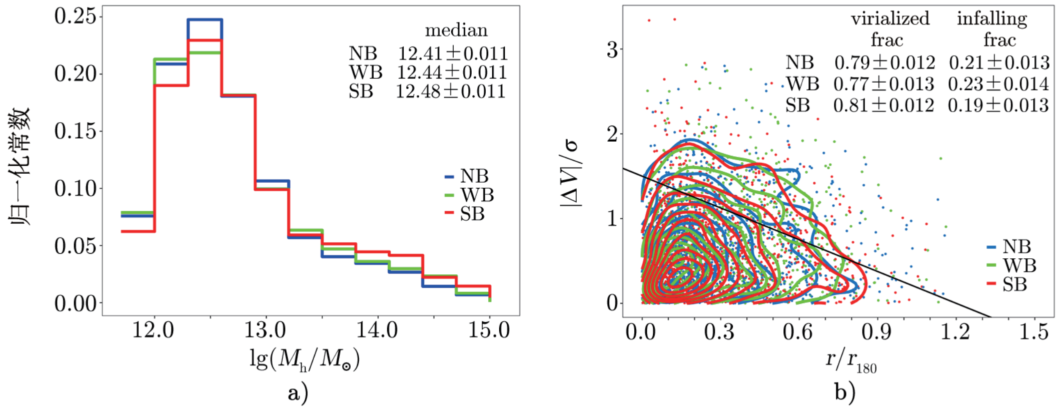
3.2 棒星系与环境

在本节中，我们对棒星系所处环境参量进行分析，其中具体参数包括星系所处星系群的暗晕质量 (M_h)、归一化后的星系所处星系群的位置 (r/r_{180}) 以及由星系群速度弥散归一化后的星系的视线方向退行速度 ($|\Delta V|/\sigma$) 。我们首先画出“Morph-M_h-SFR”样本中控制恒星质量的三种棒星系样本的 M_h 直方图，见图 4a)。其中红色数据代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系，可以明显看到棒强度越强的样本，其星系所处星系群的 M_h 分布就越趋向于大暗晕端。此外，通过右上角图标中 M_h 的中位值，也可以看到有棒星系更偏向于分布在大暗晕里，强棒星系最为显著。

暗晕质量不是描述星系环境的唯一参数，星系在暗晕中所处位置及速度状态也很重要。相空间图在研究星系团的形成历史[30]以及回溯星系在其中的轨道历史等方面是一种有效的工具。相空间图的横坐标为 r/r_{180}，纵坐标为 $|\Delta V|/\sigma$，通过星系在相空间图上分布位置的不同[31]，可以将星系团中的星系所处位置分为位力化区域 (virialized) 和内落区域 (infalling)。位力化区域中的星系一般认为已经在星系团内部并且在动力学状态下处于动态平衡的状态，而内落区域表示星系正在处于从外围掉落到星系团内部的一个过程。那么，相空间图所表征的不同状态是否会和暗晕质量一样，与棒的强度具有相关性？我们选取“Morph-M_h/σ-SFR”星系样本，控制恒星质量和暗晕质量之后 (阈值都设为 0.1 dex)，得到三种棒星系的控制样本各 1 031 个。在样本控制过程中，部分强棒星系在阀值范围内未获得样本匹配，因此最终样本数目有所下降。我们在图 4b) 中给出相空间图，其中红色数据代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系。在划分相空间区域时，我们采用 Jaffe 等人[31]的方法，如图中黑线所示，所用公式为：

$$|\Delta V|/\sigma \leqslant 1.5 - 1.25\, r/r_{180}\ , \quad r/r_{180} \leqslant 1.2 \quad . \tag{3}$$

在相空间图上，三种类型星系的分布存在细微差别，其中强棒、弱棒和无棒星系中处于



注：a) 为“Morph-M_h-SFR”样本中，控制了恒星质量的三种棒星系的暗晕质量分布直方图。三种棒星系的样本个数各为 4 273 个。b) 为“Morph-M_h/σ-SFR”样本中，控制了恒星质量和暗晕质量的三种棒星系的相空间图。图中黑线为 Jaffe 等人[31]的方法所得，线右上角为内落区域，线左下角为位力化区域。三种棒星系的样本个数各为 1 031 个。样本的控制参数的阈值都设为 0.1 dex，红色图例代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系。

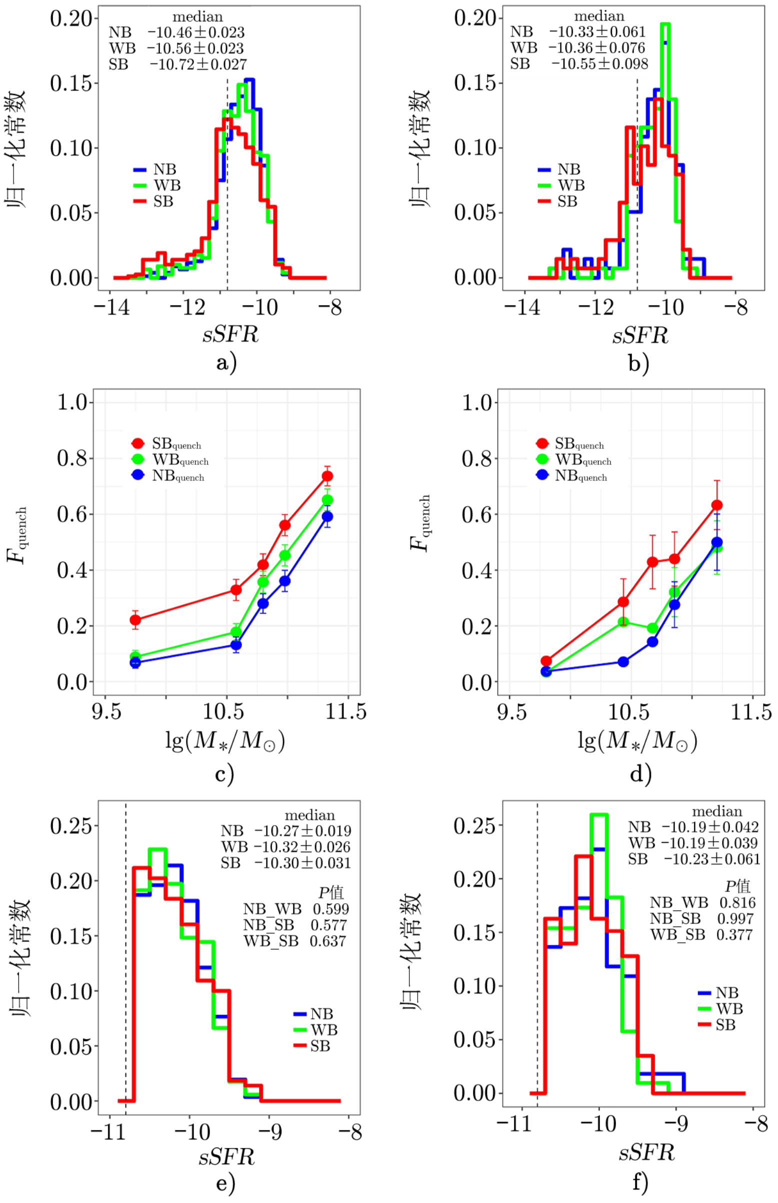
图 4　“Morph-M_h-SFR”样本中控制样本星系所处暗晕质量分布，及“Morph-M_h/σ-SFR” 样本中控制样本星系的相空间图分布

位力化区域的比例分别为 0.81、0.77 和 0.79。从比例数据上来看，处于位力化区域的强棒星系比例是最高的，这与强棒星系整体上处于偏向高密环境 (处于大质量暗晕内) 的趋势是一致的。但是，有趣的是，处于位力化区域的弱棒星系的比例是最低的，而不是无棒星系。此外，考虑统计误差，三种星系的比例之间的差异也并不显著。因此，要更深程度确认三种类型星系在相空间分布图上可能存在的差异，还需要进一步扩大棒星系的样本。

综上所述，在本节中，通过棒星系样本的环境特征分析，我们得到，有棒星系和无棒星系所处的环境 (特别是在暗晕质量上) 存在一定的系统差别，其中强棒星系偏向于高密环境。由于高密环境整体上对星系的恒星形成起抑制作用，因此我们在 3.1 节中得到的有棒星系整体上具有更高比例的熄灭星系及 SF 星系 $sSFR$ 系统性偏低的结论中需要进一步考虑环境效应可能带来的偏差。

3.3　控制环境因素后棒星系的恒星形成

本节中，我们基于“Morph-M_h/σ-SFR”样本，并同时控制恒星质量和暗晕质量，得到控制样本。此外，我们通过分离位力化区域星系和内落区域星系，来消除星系位于相空间图的不同位置而可能带来的环境效应的偏差。最终，我们得到位于位力化区域的三种棒星系的控制样本各 786 个，位于内落区域的三种棒星系数目各 138 个。在样本控制过程中，由于样本匹配分别在位力化区域和内落区域进行，因此在相同的质量和暗晕质量阀值下，最终匹配出的样本数 (786+138) 相比于 3.2 节中控制样本数 (1 031 个) 有进一步下降。 图 5a)、c)、e) 给出位力化区域星系的性质，内落区域星系相应位于图 5b)、d)、f) 。图 5a)、b) 为 $sSFR$ 分布直方图，左上角图标中列出三种棒星系样本中 $sSFR$ 中位值及误差。由分布直方图及 $sSFR$ 的中位值可以看到，处于不同相空间图的位置，强棒星系相较于弱棒和无棒



注：图中样本都针对三种棒星系样本控制了恒星质量和暗晕质量。a)、c)、e) 为位力化区域星系样本，b)、d)、f) 为内落区域星系样本。上面一行为 $sSFR$ 的分布直方图：a) 各 786 个星系，b) 各 138 个星系；中间一行为不同棒星系样本中 $F_{\rm quench}$ 的点线图：c) 各 786 个星系，d) 各 138 个星系；下面一行为三种棒星系样本中 SF 星系 $sSFR$ 的分布直方图：e) 共 1 503 个，f) 共 300 个。红色图例代表强棒星系，绿色代表弱棒星系，蓝色代表无棒星系。

图 5 “Morph-M_h/σ-SFR”样本中，不同相空间图位置中的恒星形成分析

星系，其 $sSFR$ 都更低，且位力化区域这种差异更为显著。c)、d) 两图为不同棒星系样本中，$F_{\rm quench}$ 的点线图。每个点的误差同图 3b)，是通过有放回的随机抽样计算所得。可以看到，在不同的细分环境中，有棒星系中的 $F_{\rm quench}$ 都高于无棒星系，而且强棒星系高于弱棒。也就是说，在同时控制质量和环境因素之后，棒特征越为明显的星系样本中包含更多比例的“熄灭”星系。

到此为止，我们给出了星系中的棒特征和恒星形成特征直接相关的证据。但是，这种更高比例的“熄灭”星系是由什么样的物理机制造成的呢？是否是因为星系中的棒特征在某种物理机制 (如降低恒星形成效率) 作用下整体上降低了星系的 $sSFR$ ，从而使得更多的星系进入熄灭状态？为了验证该猜想，我们进一步考察 SF 星系的 $sSFR$ 和棒特征的关系。

图 5e)、f) 两图给出了控制样本中三种棒星系内 SF 星系部分 ($sSFR > -10.8$) 的 $sSFR$ 分布：图 e) 为位力化区域星系的 SF 部分，三种棒星系共 1 503 个；图 f) 为内落区域星系的 SF 部分，三种棒星系共 300 个。此外，我们将这些星系 $sSFR$ 的中位值标记在右上角中。由 $sSFR$ 的中位值可以看到，在控制了恒星质量和环境因素之后，当只考虑 SF 星系部分 ($sSFR > -10.8$) 时，三种不同棒特征星系的 $sSFR$ 不再具有显著差别。为了进一步说明这一点，我们对这三个样本的 $sSFR$ 分布进行了两两比较的 KS 检验，并将检验结果中表示样本两两对比是否具有相同分布的 P 值标记在图的右上角。由 KS 检验的 P 值可以看到，在只考虑 SF 星系时，与我们预期的棒特征能整体上降低星系的 $sSFR$ 的猜测不同的是，三种不同棒特征的 SF 星系样本具有相同的 $sSFR$ 分布。

综上所述，结合上中下三行图例可以看到，图 5a)、b) 给出的有棒星系的平均 $sSFR$ 系统性偏低的原因是因为有棒星系中有更高比例的“熄灭”星系 (见图 5c)、d))。只考虑 SF 星系，在考虑质量和环境的选择偏差之后，有棒和无棒星系的恒星形成特征并没有显著差别。这正是本文得到的最主要的结论。

根据以上结论，可以推断，如果是棒特征导致了“熄灭”星系比例偏高的话 (见图 5c)、d))，那么这个棒特征驱动的恒星形成熄灭过程必然是一个比较迅速的过程，只有这样才能在观测上不影响 SF 星系的 $sSFR$ (见图 5e)、f))。对于具有棒特征的“熄灭”星系来说，并不是因为棒导致了恒星形成的“熄灭”，而是反过来“熄灭”星系中存在某种更容易激发棒特征的假设，这样的因果关系也是可能的。值得指出的是，我们的统计研究本质上只是给出两种物理特征之间的相关性，而并不能给出其因果性。要厘清两种不同的因果关系，需要借助数值模拟等其他研究工具[32, 33]，而这已经超出本文的研究范围。

4　总结与展望

在本工作中，我们选取了 GZD 数据中的棒旋星系样本，结合 GSWLC-X2 数据中的恒星形成信息，以及 Yang 等人[26] 星系群样本中的星系所处环境信息，得到了目前为止最大的强棒和弱棒星系样本。我们首先对比分析了不同棒特征星系在质量、恒星形成和环境特征等物理参量的分布上存在的差别。在通过构建控制样本控制质量和环境参量之后，我们系统

地对棒旋星系中的棒与星系自身的恒星形成之间的相关性进行了统计分析。具体结论如下：

(1) 有棒星系相较于无棒星系，拥有更大的恒星质量和更低的 $sSFR$，处于更大的暗晕中，更多的处在位力化的区域。相关物理特征的差别，强棒星系比弱棒星系更为显著。

(2) 在相同的质量和环境效应下，棒旋星系的“熄灭”比例更多。同样，该效应中，强棒星系比弱棒星系更为显著。

(3) 在相同的质量和环境效应下，对于仍处于恒星形成主序区域内的星系来说，有棒星系和无棒星系的整体 $sSFR$ 并无明显区别。

我们的研究首次系统性地分离了环境因素可能对星系 $sSFR$ 带来的偏差，在此基础上得到的有棒星系和无棒星系的 $sSFR$ 特征的差别更能反映星系的棒特征和恒星形成性质在物理上的关联，对于棒旋星系的研究具有参考价值。

我们研究中的 $sSFR$ 描述星系整体的恒星形成特征，这一整体特征可能对星系中的局域恒星过程并不敏感。而棒特征对星系恒星形成特征的影响可能并不是整体的，而是局部的。比如，Lin 等人[2]的研究表明，棒特征仅对星系中心区域的 SFR 存在一定抑制作用。如果星系中心部分的 SFR 占据星系整体 SFR 的比例不大的话，那么中心部分 SFR 的抑制并不能显著降低星系整体的 SFR。这样，我们就不一定能探测到有棒的恒星形成星系的平均 $sSFR$ 的显著降低。要进一步探讨星系中的棒特征对恒星形成影响的细节物理过程，我们可以从两方面进行拓展。一方面，我们可以细化星系中棒的物理特征，比如定量计算棒的强度[25]，而不是采用本文中的人眼得到的简单的强弱特征；另一方面，我们可以参考 Lin 等人[2]的研究工作，在大样本的基础上，借助多波段图像进行不同区域的 SED 拟合，从而细致分析棒特征对星系内部物理恒星形成过程的影响。

参考文献：

[1] Kormendy J, Kennicutt R C. ARA&A, 2004, 42: 603
[2] Lin L, Li C, He Y, et al. ApJ, 2017, 838: 105
[3] Kim E, Hwang H S, Chung H, et al. ApJ, 2017, 845: 93
[4] Nair P B, Abraham R G. ApJS, 2010, 186: 427
[5] Nair P B, Abraham R G. ApJL, 2010, 714: L260
[6] Lee G H, Park C, Lee M G, et al. ApJ, 2012, 745: 125
[7] Guo Y, Jogee S, Finkelstein S L, et al. arXiv:2210.08658, 2022
[8] Rosas G Y, Bonoli S, Dotti M, et al. MNRAS, 2020, 491: 2547
[9] Zana T, Lupi A, Bonetti M, et al. MNRAS, 2022, 515: 1524
[10] Bi D, Shlosman I, Romano-Díaz E. ApJ, 2022, 934: 52
[11] Cervantes S B, Li C, Park C. ApJ, 2015, 807: 111
[12] Consolandi G, Dotti M, Boselli A, et al. A&A, 2017, 598: A114
[13] Tahmasebzadeh B, Zhu L, Shen J, et al. ApJ, 2022, 941: 109
[14] Martinez-Valpuesta I, Aguerri, J A L, González García A C, et al. MNRAS, 2017, 464: 1502
[15] Tawfeek A A, Cervantes Sodi B, Fritz J, et al. ApJ, 2022, 940: 1
[16] Zana T, Dotti M, Capelo P R, et al. MNRAS, 2018, 479: 5214
[17] Ghosh S, Saha K, Di Matteo P, et al. MNRAS, 2021, 502: 3085
[18] Sidney van den B. AJ, 2002, 124: 782
[19] Barazza F D, Jablonka P, Desai V, et al. A&A, 2009, 497: 713

[20] Sarkar S, Pandey B, Bhattacharjee S. MNRAS, 2021, 501: 994
[21] Boselli A, Fossati M, Sun M. A&ARv, 2022, 30: 3
[22] Petersson J, Renaud F, Agertz O, et al. MNRAS, 2023, 518: 3261
[23] Chabrier G. PASP, 2003, 115: 763
[24] Walmsley M, Lintott C, G'eron T, et al. MNRAS, 2022, 509: 3966
[25] Géron T, Smethurst R J, Lintott C, et al. MNRAS, 2021, 507: 4389
[26] Yang X, Mo H J, van den Bosch F C, et al. ApJ, 2007, 671: 153
[27] Beers T C, Flynn K, Gebhardt K. AJ, 1990, 100: 32
[28] Salim S. Serbian Astronomical Journal, 2014, 189: 1
[29] Donnari M, Pillepich A, Nelson D, et al. MNRAS, 2021, 506: 4760
[30] Muzzin A, van der Burg R F J, McGee S L, et al. ApJ, 2014, 796: 65
[31] Jaffe Y L, Smith R, Candlish G N, et al. MNRAS, 2015, 448, 1715
[32] Cavanagh M. K, Bekki K, Groves B A, et al. MNRAS, 2022, 510: 5164
[33] Rosas-Guevara Y, Bonoli S, Dotti M, et al. MNRAS, 2022, 512: 5339

Statistical Study of the Relationship Between Bar and the Overall Star Formation Properties of Galaxies

MU Zi-hao[1,2], SHEN Shi-yin[1,3], Rafael S. de Souza[4], Ana L. Chies-Santos[5]

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Lab for Astrophysics, Shanghai 200034, China; 4. Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield AL10 9AB, UK; 5. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, Porto Alegre 9500, Brazil)

Abstract: The bar structure of disk galaxies, their environment, and overall star formation properties are known to be intricately linked. By utilizing data from the Galaxy Zoo DECaLS program, we have assembled the largest sample of strong bar, weak bar, and no bar galaxies with matching stellar mass distributions. We analyzed the specific star formation rates (sSFR) of these galaxies after controlling for environmental effects by matching the halo mass and phase space diagram of the dark matter halo in which the galaxy resides. Our findings suggest that the percentage of quenched galaxies in the barred galaxy sample is consistently higher than that in non-bar galaxies, with a more pronounced effect for strong bar galaxies. However, for galaxies that are still on the star formation main sequence, there is no significant difference in their sSFR distribution. These results suggest that the presence of a bar in a galaxy may rapidly transition some galaxies from being star-forming to quenched in a short period of time.

Key words: barred spiral galaxy; SFR; environment